一种新型的发动机电磁气门驱动结构及其磁场有限元分析

李世作

（广西大学电气工程学院，广西南宁市，530004）

摘要：在发动机电磁气门驱动研究中，提出一种新型的电磁结构，它利用空气作阻尼，体积紧凑。应用有限元法对电磁气门驱动的磁场进行精确计算，计算不同气隙时的电磁能量，最后利用虚位移法计算电磁力。

计算表明，电磁力能够满足电磁气门驱动的动力性能需求。研究结果对电磁气门驱动结构参数的优化和控制方法的研究有较好的指导意义。

关键词：发动机；电磁气门驱动；有限元法；电磁能量；电磁力

中图分类号：TK402　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：

A New Structure of Electromagnetic Valve Actuation for Engine and Finite Element Analysis of Its Magnetic Field

LI Shi-zuo

（College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004）

Abstract: A new electromagnetic structure is introduced in the research of electromagnetic valve actuation (EVA) for engine; it uses air as damp and has compact volume. The magnetic field of EVA has been calculated accurately by finite element method, the electromagnetic energy of different gap can be got and the electromagnetic force can be calculated by virtual displacement method. Calculation shows that the electromagnetic force of this new structure can meet the dynamic requirements of EVA. Research result is beneficial to optimization of structure parameter and achievement of control method for EVA.

Key Words: engine, electromagnetic valve, finite element method, electromagnetic energy, electromagnetic force

引言

发动机电磁气门驱动(Electromagnetic Valve Actuation, EVA) 是用电磁铁代替凸轮轴来驱动和控制气门运动，它可以简化发动机结构，灵活地单独控制各气门，实现依次停缸[1-3]。EVA是汽车发动机设计及其电子控制技术的研究前沿之一，国内外已进行了多年的研究工作并取得了一些进展，但还未达到实用的程度。

EVA必须满足如下性能：（1）提供足够的电磁力；（2）结构紧凑，尺寸小，以便能布置在多气门的气缸盖上，一般单缸四气门，双排列即两进气两排气；（3）能够在每分钟500-6000转的速率下正常运行；（4）在高温下工作，尽可能不使用受温度影响较大的材料；（5）落座时保证“软着陆”，避免刚性碰撞。

EVA的结构有多种[4]，各有优缺点。国内清华大学汽车安全与节能国家重点实验室对EVA电磁力的特性进行了大量的计算和实验[5-8]，取得了很多有意义的成果。本文提出一种新型的EVA结构，并利用有限元法对EVA电磁机构的磁场进行精确计算，研究相同电流密度、不同气隙下电磁力的变化情况，研究结果不仅有利于EVA的设计，还对EVA控制方法的选择和实现有较好的指导意义。

1 计算方法

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.1 EVA 结构

EVA 如图 1 所示，轴对称结构，两边是两个左右对称的固定铁芯和线圈，线圈通有相对固定的电流，大小相等方向相反，中间的铁芯和线圈固定在轴上，可以向左或向右作轴向运动。磁场力分析表明：当中间线圈的电流与左边线圈的电流方向相同时，向左运动；当中间线圈的电流与右边线圈的电流方向相同时，向右运动。因此只改变中间线圈的电流，就可以使之向左或向右运动，带动气门打开或闭合。

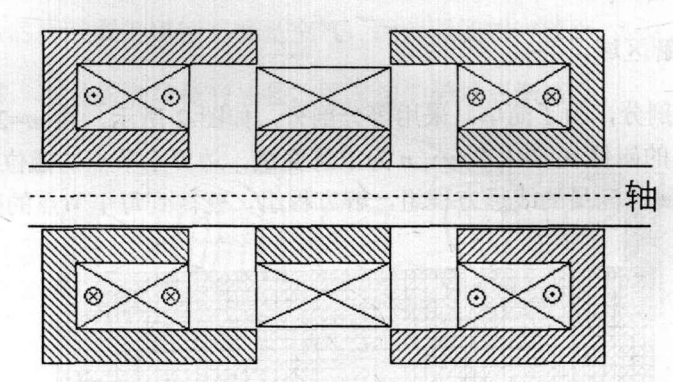

图 1 EVA 的结构

Fig.1 Structure of EAV

这个 EVA 结构的优点是：（1）结构紧凑，容易布置在多气门的气缸盖上；（2）只需控制中间线圈的电流，控制电路简单；（3）中间线圈和铁芯与左右两边的线圈和铁芯组成一个气缸，中间线圈和铁芯运动时会挤压里面的空气，产生一个反向的作用力，因此可利用空气阻尼，再结合电流控制来实现“软着陆”，解决使用弹簧易受温度影响和尺寸大的缺点。

1.2 有限元法

根据电磁场理论[9]，EVA 中的磁场满足：

$$\nabla \times H = J \qquad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \qquad (2)$$

其中 H 为磁场强度，单位为 A/m，B 为磁感应强度，单位为 T，J 为电流密度，单位为 A/m^2。H 和 B 的关系有：$H=B/\mu$，μ 为材料的磁导率，单位为 H/m。

根据矢量恒等式，矢量的旋度的散度等于零，由式（2），可以引进矢量磁位 A，使得：

$$\nabla \times A = B \qquad (3)$$

将式（3）带入式（1），再经过矢量恒等式变换，得到矢量磁位 A 满足的偏微分方程：

$$\nabla^2 A = -\mu J \qquad (4)$$

由于是轴对称结构，采用圆柱坐标（r, α, z）比较方便。这时由于电流密度 J 只有 α^0 分量，因此 A 也只有 α^0 分量，没有径向 r^0 和轴向 z^0 分量，而且只与变量 r 和 z 有关，与变量 α 无关。因此可以把 A 看成只随 r 和 z 变化的标量函数，并且有：

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$B = -\frac{\partial A}{\partial z}r^0 + (\frac{A}{r} + \frac{\partial A}{\partial z})z^0 \qquad (5)$$

按照变分原理，偏微分方式（4）对应泛函极值问题[10]：

$$P(A) = 2\pi \int_S \frac{1}{2\mu} B^2 r dr dz - 2\pi \int_S JA r dr dz = \min \qquad (6)$$

式中 S 为子午面上的求解区域。

将 S 用三角形进行剖分，为了简单，采用等分剖分，如图 2 所示，共 m=2400 个三角形单元，n=1281 个节点。以节点的磁位 A_i, i=1, 2, …, n 为求解变量，边界上节点的磁位设为零。通过单元积分和求极值，得到节点磁位满足的线形方程组，解方程组，就得到每个节点的磁位。

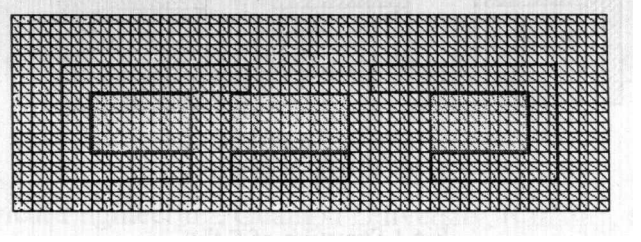

图 2 单元剖分

Fig.2 Element Dissection

1.3 电磁能量和电磁力

根据电磁场理论，电磁能量连续分布地存贮在整个场域中，而且电磁能量的密度为 $HB/2$。电磁能量通常有如下两种计算方法：

$$W = \frac{1}{2}\int HB dV = 2\pi \int_S \frac{1}{2\mu} B^2 r dr dz \qquad (7)$$

$$W = \frac{1}{2}\int JA dV = 2\pi \int_S \frac{JA}{2} r dr dz \qquad (8)$$

理论上，这两种方法是相等的，但在实际的数值计算中还是有一定的差异。式（7）需要先对磁位 A 按式（5）求偏导运算再积分，这会带来额外的误差，因此精度稍差；式（8）不需要对磁位 A 求偏导运算，直接进行积分，因此精度较好。

根据虚位移法，电磁能量对位移距离的导数就是电磁力，因此 EVA 的轴向电磁力为：

$$F = \frac{\partial W}{\partial z} \qquad (9)$$

2 计算结果

设左边线圈的电流密度 J_1=17MA/m^2，右边线圈的电流密度 J_2= -17MA/m^2，中间线圈的电流密度 J_3= -17MA/m^2，中间线圈的电流与右边线圈的电流方向一样，因此中间铁芯和线圈向右运动。

设中间线圈到左边线圈的间隙为 δ。在图 1 的结构中，当 δ=0 时，两个铁芯吸合，电磁力非常

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大，不易控制，而反向运动的初始阶段，反向电磁力很小，不易启动，因此在左右两个线圈和铁芯贴一层 1mm 厚的非磁性材料，避免中间线圈与左右两边的线圈和铁芯直接接触，δ 从 1mm 变化到 11mm，相当于运动距离为 10mm。为了得到精确的运动过程，改变间隙 δ 反复计算，获得不同的 δ 下电磁力的大小。

2.1 磁场分布

图 3 为不同间隙 δ 时对应的磁场分布。由于左右两边磁路的铁芯较长，因此铁芯和线圈的磁场比较大。由于中间铁芯和线圈的磁路主要是空气，因此磁场相对较小。

当间隙 δ 变大时，右边的磁场得到加强，而左边的磁场逐渐减小。

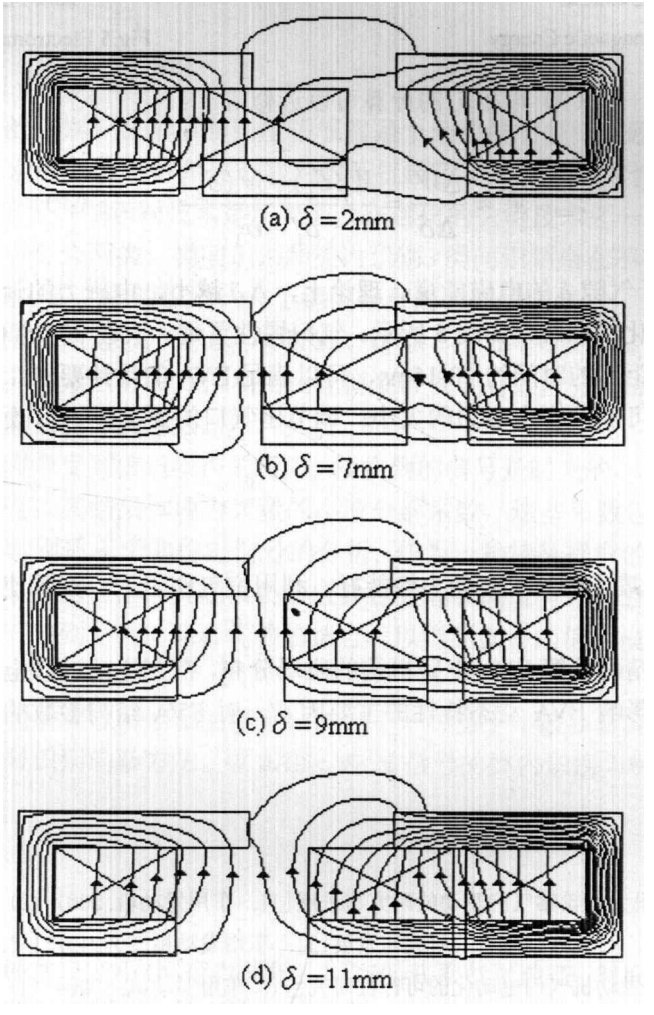

图 3　磁场分布

Fig.3 Distribution of Magnetic Field

2.2 能量和力

从 1mm 到 11mm 改变间隙 δ 的大小反复进行有限元计算，得到 EVA 的电磁能量随 δ 变化的曲线，如图 4 所示。磁场分布表明，中间线圈电流产生的磁场与左边线圈电流产生的磁场相互抵消，而与右边线圈电流产生的磁场相互加强。当气隙比较小时，左边抵消的作用大过右边的加强作用，因此磁场能量较小；当气隙比较大时，左边抵消的作用小于右边的加强作用，因此磁场能量较大。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

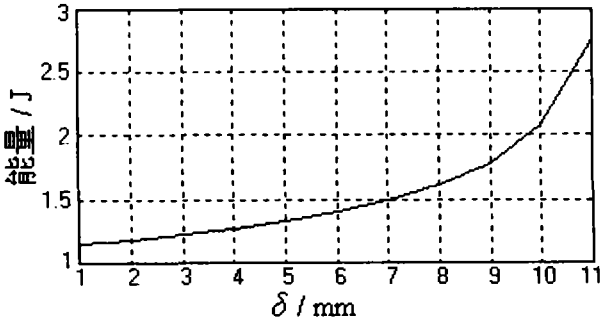

图 4 电磁能量

Fig.4 Electromagnetic Energy

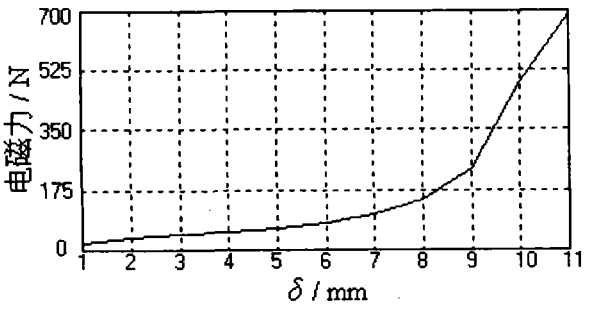

图 5 电磁力

Fig.5 Electromagnetic Force

利用数值微分方法，式（9）电磁力的计算可以近似等于：

$$F \approx \frac{\Delta W}{\Delta \delta} = \frac{W(\delta_1) - W(\delta_2)}{\delta_1 - \delta_2} \qquad (10)$$

式中 $W(\delta)$为 EVA 对应于气隙 δ 的电磁能量。理论上，$\Delta\delta$ 越小，电磁力的计算越精确。

EVA 电磁力随 δ 变化的曲线，如图 5 所示。气门惯性重量一般在 300-500g 范围内，如不考虑空气阻尼，移动 10mm 的距离的时间约 10-15ms，可以满足 EVA 的设计要求。

调节线圈的电流，可以改变电磁力的大小；调节出气口的面积，可以改变空气阻尼的大小，以满足“软着陆”的需求。

3 结论

新型的 EVA 结构紧凑，体积小，动力性能好，利用空气作阻尼，克服使用弹簧易受温度影响和尺寸大的缺点。

采用有限元法可以精确计算 EVA 电磁机构的磁场分布，得到运动过程电磁能量和电磁力的变化曲线，可以更好地分析影响 EVA 动态特性的主要因素，对 EVA 结构参数的优化和控制方法的研究有较好的指导意义。

参考文献

[1] 李红艳, 赵雨东. 发动机无凸轮轴气门驱动的研究与进展[J]. 车用发动机, 2001 (2): 1-5.

[2] 陈勤学, 催可润, 朱国伟. 可变气门系统的研究与发展[J]. 车用发动机, 2002(3):1-5.

[3] 麻友良，郭建忠. 车用发动机气门电动化的可行性研究[J]. 车用发动机. 2004 (4):39-42.

[4] 陈似竹，赵雨东，付雨民. 电动机电气气门驱动中的电磁铁结构方案分析[J]. 车用发动机. 2003 (3):25-28.

[5] 付雨民, 赵雨东. 采用磁场分割法进行的发动机电磁气门驱动(EVA)仿真计算[J]. 内燃机工程. 2003 (1): 1-5.

[6] 赵雨东, 吴亚楠, 付雨民等. 发动机电磁气门驱动设计试验与仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版). 2003 (5): 698 701.

[7] 王秋华，赵雨东，付雨民. 发动机电磁气门驱动有限元法仿真计算[J]. 车用发动机. 2006 (4): 35-38.

[8] 吴亚楠, 赵雨东. 发动机电磁气门驱动动态特性试验研究[J]. 内燃机工程. 2003(5): 10-13.

[9] 冯慈璋. 电磁场[M]. 高等出版社. 1991.

[10] 盛剑霓. 工程电磁场数值计算[M]. 西安交通大学出版社. 1991

基金项目：科技部科技型中小企业技术创新基金项目（03C26224500661）

作者简介：李世作（1969-），男，广西南宁市人，副教授；E-mail：szli213@sina.com.cn

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net